



(T2) Análisis histórico del retroceso glaciar en el nevado del Ruiz considerando el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur

Historical analysis of glacier retreat in the Nevado del Ruiz considering El Niño-Southern Oscillation

*Cristian Salas Pérez¹, Efrem Giovani Salazar Bejarano²,
Juan Camilo Meza Alcarcel³, Daniel Felipe Coy Castro³ & Erika Sofia Upegui⁴*

Para citar este artículo: Salas-Pérez, C., Salazar-Bejarano, E.G. Meza-Alcarcel, J.C., Coy-Castro, D.F. & Upegui, E.S. (2019). Análisis histórico del retroceso glaciar en el nevado del Ruiz considerando el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur. UD y la Geomática, (14), pp-pp

Fecha de recepción: 14 de mayo de 2019 Fechas aceptación: 02 de diciembre de 2019

(T2) Resumen

En este estudio se analiza el retroceso glaciar del nevado del Ruiz con 27 imágenes del satélite Landsat con un periodo de monitoreo que inicia en el año 1976 y va hasta 2018. Las imágenes fueron procesadas para lograr discriminar el área glaciar usando el índice espectral NDSI (*normalized difference snow index*). El área glaciar fue extraída mediante una clasificación no supervisada por el clasificador K-Means. Al área glaciar obtenida de cada imagen se le asoció el valor de *oceanic Niño index* (ONI) correspondiente a la fecha de cada imagen, analizando la influencia de los ciclos cálidos y fríos de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por su sigla en inglés) en la variación de área glaciar. Para validar esta relación se ajustó una función descrita por una serie de Fourier con un R^2 de 0,76, la función permitió asociar la variación de área glaciar con las oscilaciones ENSO. Una función de suma de senos relacionando el área glaciar y tiempo también fue ajustada, sin embargo, esta función no fue suficiente para predecir una fecha de descongelamiento del glaciar. El análisis de los

¹ Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá – Colombia. Semillero de investigación GRSS. Grupo GEFEM.

² Correo electrónico: egsalazarb@correo.udistrital.edu.co

⁴ Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá – Colombia. Semillero de investigación GRSS. Grupo GEFEM. Correo electrónico: esupeguic@udistrital.edu.co

resultados obtenidos de la serie de tiempo muestra que el glaciar es afectado en periodos ENSO de altas temperaturas (El Niño), perdiendo gran parte de su área glaciar y recuperándola en periodos ENSO más fríos (La Niña), contradiciendo los estudios que definen la pérdida de área glaciar con una función lineal negativa.

Palabras clave: retroceso glaciar, teledetección, ENSO, serie de tiempo, nevado del Ruiz.

Abstract

This study analyzes the glacier retreat of Nevado del Ruíz with 27 images from the Landsat satellite with a monitoring period that begins in 1976 and goes until 2018. The images were processed to discriminate the glacier area using the spectral index NDSI (Normalized Difference Snow Index). The glacier area was extracted using the unsupervised classification by the K-Means classifier. The glacier area obtained from each image was associated with the Oceanic Niño Index (ONI) value corresponding to the date of each image, analyzing the influence of the warm and cold cycles of the ENSO (El Niño - Southern Oscillation) in the glacier area variation. To validate this relationship, a function described by a Fourier series with an R^2 of 0.76 was adjusted, the function allowed associating the glacial area variation with the ENSO oscillations. A summation function of Breasts relating the glacier area and time was also adjusted, however, this function was not sufficient to predict a date of thawing of the glacier. The analysis of the results obtained from the time series shows that the glacier is affected in ENSO periods of high temperatures (El Niño), losing a good part of its glacier area and recovering it in colder ENSO periods (La Niña), contradicting the studies define the loss of glacial area with a negative linear function.

Keywords: Glacier retreat, remote sensing, ENSO, time series, Nevado del Ruíz

Resumo

Neste estudo recuo glacial Nevado del Ruiz, com 27 imagens de satélite Landsat com um período de vigilância que começa em 1976 e é executado através de 2018. As imagens foram processadas para conseguir discriminar a área geleira usando o índice espectral é analisada NDSI (Índice de Neve de Diferença Normalizada). A área glaciar foi extraída usando a classificação não supervisionada pelo classificador K-Means. área Glacier obtidos a partir de cada imagem vai associar o valor do Índice Niño oceânico (ONI) correspondente à data de cada imagem, analisando a influência do quente e frio ciclos ENSO (El Niño - Oscilação Sul, por sua sigla em Inglês) na variação da área glaciar. Para validar esta relação, foi ajustada uma função descrita por uma série de Fourier com um R^2 de 0,76, cuja função permitiu associar a variação da área glacial às oscilações do ENSO. Uma função somatória dos Seios relacionando a área glacial e o tempo também foi ajustada, no entanto, essa função não foi suficiente para predizer uma data de degelo da geleira. A análise dos resultados da série histórica mostra a geleira é afetado em períodos ENSO de altas temperaturas (El Niño) que perdem muito de sua área de geleira e recuperação de períodos Enso refrigerador (La Niña), estudos contradizendo definir a perda de área glacial com uma função linear negativa.

Palavras-chave: Retiro glacial, sensoriamento remoto, ENSO, série temporal, Nevado del Ruíz

(T2) Introducción

El fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por su sigla en inglés) es el conjunto de variaciones atmosféricas y oceánicas en la región del océano Pacífico ecuatorial (Puertas y Carvajal, 2008). Según Kovats (2000) el ENSO es el ejemplo más conocido de variabilidad climática natural casi periódica en la escala de tiempo interanual; comprende cambios en la temperatura del mar en el océano Pacífico (El Niño-fase cálida o La Niña-fase fría) y cambios en la presión atmosférica en la cuenca del Pacífico (la Oscilación del Sur), junto con los efectos resultantes en el clima mundial. Los eventos del ENSO ocurren en intervalos de dos a siete años (Kovats, 2000). En ciertos países alrededor del Pacífico y más allá, El Niño está asociado a condiciones climáticas extremas que pueden causar inundaciones y sequías, y a nivel mundial está vinculado a un mayor impacto de los desastres naturales (Kovats, 2000). Las fases del ENSO pueden causar altas temperaturas que pueden generar variaciones en los glaciares tropicales (retroceso glaciar) y para los glaciares de baja altitud pueden presentarse descongelamientos totales en esta fase climática (Thompson, Mosley-Thompson, Davis y Brecher, 2011).

Un glaciar es definido por Meier en 1964 (citado por Knight, 1999), como un cuerpo de hielo que se origina en la superficie terrestre por recristalización de nieve u otras formas de precipitación sólida y que muestra evidencia del flujo pasado y presente. Los glaciares afectan, y son afectados, por muchos elementos del sistema global y cumplen un rol central en el funcionamiento de este sistema; ya que son la evidencia de los entornos actuales y anteriores, muestran la interacción de la glaciación con los eventos climáticos en un rango de escalas de tiempo; con fenómenos geológicos que van desde la geomorfología y la sedimentología hasta la tectónica y el volcanismo; con la circulación océano/atmósfera y el ciclo hidrológico; y con actividad biótica (Knight, 1999). Los glaciares tienen una gran importancia en el suministro de agua a las poblaciones para su consumo, actividades agrícolas o generación de energía hidroeléctrica, entre otros. Hay varias clasificaciones de los glaciares (Knight, 1999), en función de varios aspectos. Rabatel *et al.* (2012) centraron su investigación en los glaciares de los Andes tropicales, y analizaron su tendencia en las últimas décadas. Los resultados advierten sobre una gran pérdida de área glaciar, y una de las posibles causas se centran en la influencia del ENSO en el retroceso glaciar y el aumento de la temperatura global en el último siglo. Investigaciones recientes sobre retroceso glaciar (Yue, Shen, Yu y Zhang, 2018; Pandey *et al.*, 2018) utilizan la teledetección para el monitoreo de este fenómeno, y advierten la importancia del análisis de estos ecosistemas por su relevancia ambiental como hábitat de especies y generadores de recurso hídrico; además hacen hincapié en el hecho que un glaciar es un termómetro de cambio climático. En el caso de los glaciares intertropicales (Rabatel *et al.*, 2012), estos pueden ser vistos como buenos indicadores de cambio climático dado que el clima en la zona ecuatorial se caracteriza por la ausencia de estaciones climáticas, la humedad permanece casi sin cambios a lo largo de todo el año, por tanto, los glaciares responderán con mayor sensibilidad a las variaciones de la temperatura.

Los glaciares en la cordillera central de Colombia se encuentran con frecuencia en volcanes activos (Rabatel *et al.*, 2012), y la fuerte pérdida de glaciares se aceleró por varias erupciones volcánicas en los últimos años, especialmente en nevado del Ruiz, en 1985, y en el nevado del Huila, donde las erupciones en 2007 y 2008 resultaron en una reducción del 30 % de la superficie del glaciar en dos años.

En cuanto al retroceso glaciar, los datos disponibles de los estudios realizados en Colombia muestran una contradicción total acerca de las disminuciones en las áreas y en los periodos ocurridos (Rabatel *et al.*, 2012). En resumen, a escala de los Andes tropicales, el trabajo de Rabatel *et al.* (2012), define que en cuanto a los cambios en la superficie y la longitud, desde mediados del siglo XX, la evolución de los glaciares en los Andes tropicales se puede resumir de la siguiente manera: a principios de la década de 1940 y comienzos de la de 1960, la información era escasa, pero las pruebas indican una retroceso moderado (-0,5 % respecto al año anterior); desde mediados de los años 1960 hasta la segunda mitad de la década de 1970, las posiciones de los picos de los glaciares se mantuvieron. No obstante, determinar con exactitud el momento de desaparición de los glaciares no es definitivo, ya que cada nevado tiene características geográficas distintas, pero tal como lo mencionan Rabatel *et al.* (2012), los nevados de menor altitud serán los que primero pierdan su nieve, debido a no tener la capacidad de acumulación permanente de nieve. De la misma manera, en Colombia, el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), entidad que más ha investigado los glaciares del país (Ideam, 2012), manifiesta que, a pesar del panorama actual de los nevados, dar un año de pérdida total de área glaciar puede ser arriesgado debido a la dificultad que puede significar realizar un modelo que describa este fenómeno. En el trabajo realizado por esta entidad (Ideam, 2018) se analiza la pérdida de cobertura glaciar para los glaciares colombianos (figura 1), en donde la tendencia en el retroceso de todos estos es negativa y aproximadamente lineal.

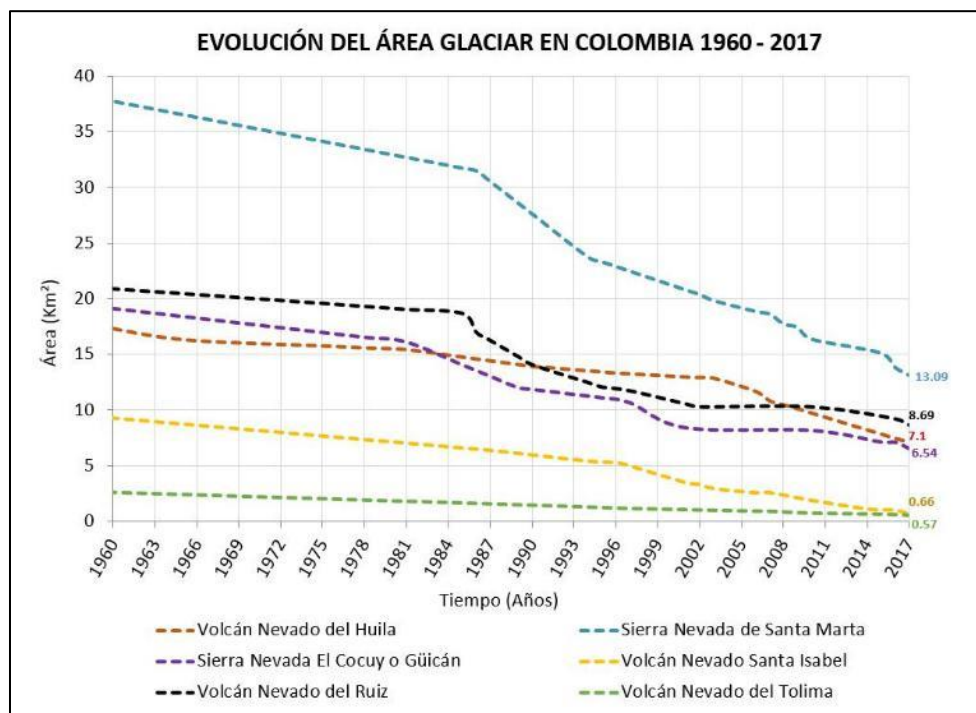


Figura 1. Retroceso glaciar nevados colombianos

Fuente: Ideam (2018).

Entre los datos disponibles que presenta el Ideam (2018) para el seguimiento del nevado del Ruiz, se evidencia un retroceso continuo a lo largo del periodo estudiado. Es importante resaltar que las áreas fueron calculadas a partir de datos de teledetección, y específicamente en los últimos años con procesos de clasificación automática (Ideam, 2018). De otra parte, Pérez y Gómez (2018) realizaron un estudio de teledetección, en el que demostraron una importante pérdida del área del glaciar del glaciar nevado del Ruiz, en el que identificaron que este proceso no es constante ya que el área glaciar puede experimentar algunas fluctuaciones dentro de las fases climáticas, incluso recuperando área que se consideraba perdida (Kaser, 1999). En Colombia, en la zona Andina, la precipitación intraanual presenta un régimen característico bimodal, con una baja pluviosidad (o temporada seca) en los trimestres de diciembre-enero-febrero (DEF) y junio-julio-agosto (JJA); y mayor pluviosidad (o temporada de lluvias) en los trimestres de marzo-abril-mayo (MAM) y septiembre-octubre-noviembre (SON) (Puertas y Carvajal, 2008). Este régimen se ve afectado por el ENSO, como es el caso del año 2015-2016, cuando en Colombia (al igual que otros países de la región) pasó por uno de los periodos de altas temperaturas y sequía más fuerte de la historia (FAO, 2016), de aquí la importancia de analizar el comportamiento del nevado del Ruiz en un periodo ENSO.

Evolución área glaciar volcán nevado del Ruiz		
Año	Área glaciar (km ²)	Fuente de datos
1850	47,5	Interpretación de fotografías aéreas. Ideam y Universidad Nacional de Colombia. 1997. <i>Geosistemas de alta montaña</i> . Bogotá.
1959	21	
1986	17	
1997	11,76	
2002	10,3	Interpretación de imágenes satelitales Landsat TM/ETM, Spot, ALOS, RapidEye, Quickbird y Sentinel. Selección autónoma a partir de combinaciones multiespectrales y posterior interpretación.
2010	10,3	
2016	9,2	
2017	8,7	

Tabla 1. Evolución área glaciar nevado del Ruiz

Fuente: Ideam (2018).

Teniendo en cuenta el contexto anterior, en este documento se analizan las fases del ENSO en su fase más caliente (El Niño) y en su fase más fría (El Niño), relacionadas con las áreas glaciares del nevado del Ruiz obtenidas a partir de 27 imágenes satelitales Landsat, donde se discrimina la capa de nieve gracias a una clasificación no supervisada y se cuantifica su área glaciar. De esta manera se obtiene una serie temporal considerable para ser la correlacionada con datos ENSO que permiten entender el comportamiento de la variación del área del glaciar.

(T2) Materiales y métodos

(T3) Zona de estudio

El nevado del Ruiz (figura 2) es un glaciar a una altitud de 5320 m s.n.m. localizado en zona ecuatorial de la cordillera central colombiana (zona andina) en el encadenado montañoso perteneciente a la cordillera de los Andes americanos al noroccidente de América del Sur (Huggel *et al.*, 2007). Administrativamente se encuentra entre el límite de los departamentos colombianos de Tolima y Caldas, donde a la vez está el Parque Nacional Natural Los Nevados del cual forma parte el nevado del Ruiz.

Este glaciar tiene una capa de hielo en promedio de 50 metros y 190 metros para la zona de mayor altitud que se encuentra encima del volcán (Ceballos *et al.*, 2006). El volcán del Ruíz es el más septentrional y de mayor altitud en la cordillera central colombiana con un estratovolcán en su cumbre plana a 5320 m s.n.m. y un cráter activo llamado Arenas; con un diámetro de 850 m y una profundidad de 250 m (Huggel *et al.*, 2007).

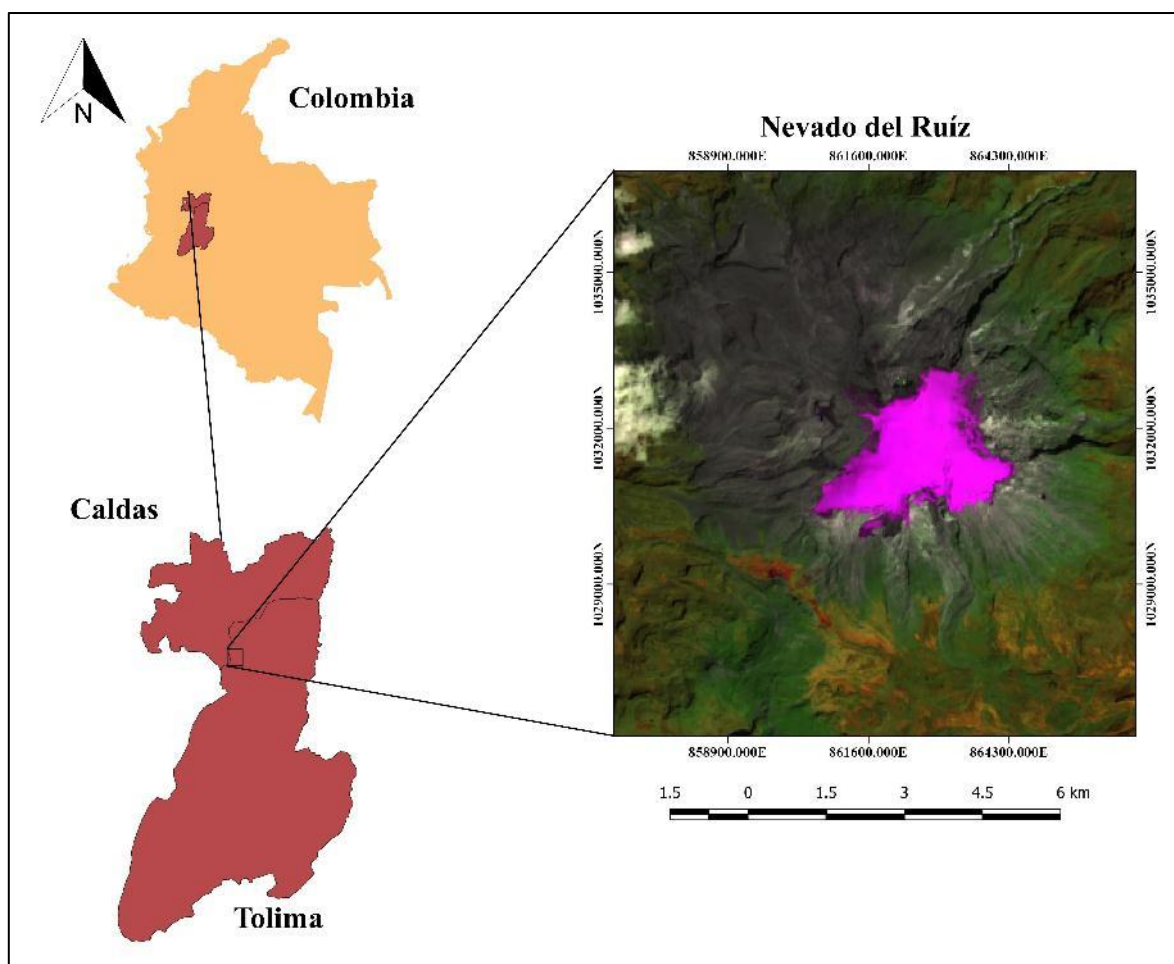


Figura 2. Ubicación geográfica del nevado del Ruiz
Fuente: elaboración propia con datos oficiales del IGAC.

Del nevado del Ruiz y Parque Nacional Los Nevados nace una red de cuencas que conectan los ríos Cauca y Magdalena, los cuales son dos de los ríos de mayor importancia de Colombia. Esta red, que nace del deshielo natural del nevado del Ruíz (resaltado en el recuadro rojo de la figura 3) antes de desembocar al río Cauca y Magdalena, abastece de agua a poblaciones cercanas, como los municipios de Casablanca, Villahermosa, Murillo y

Villamaría, esta red de cuencas está compuesta por los ríos; Claro, Molinos, Chinchiná, Gualí, Las Lagunillas y Recio. De ahí la importancia de conocer las dinámicas del glaciar por afectación directa de El Niño, ya que este fenómeno climático puede alterar el abastecimiento agua en estas cuencas, y generar problemas a las poblaciones cercanas.

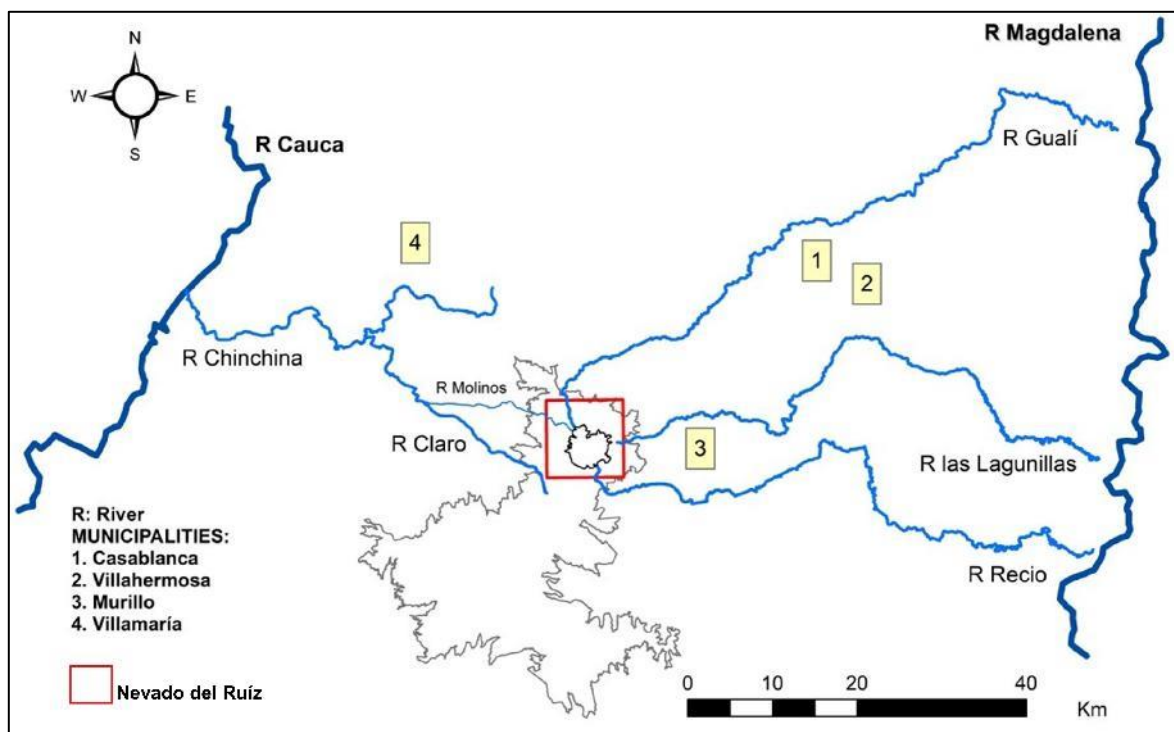


Figura 3. Cuencas hidrográficas en el área del nevado del Ruiz

Fuente: elaboración propia con datos oficiales del IGAC.

Desde 1972, la serie conjunta de satélites de Observación Geológica Landsat de la NASA/EE. UU. ha proporcionado un registro espacial ininterrumpido de la superficie terrestre de la Tierra para ayudar a avanzar en la investigación científica hacia la comprensión del planeta y el impacto ambiental de sus habitantes (Butcher, Barnes y Owen, 2019). La utilidad de la resolución espacial y espectral de Landsat ha avanzado en su uso para aplicaciones que benefician a la sociedad, como el pronóstico global de cultivos, el monitoreo forestal, el uso del agua, las evaluaciones de carbono y la base para Google Maps (Butcher, Barnes y Owen, 2019); cambiando de paradigma para el mundo con la política de datos gratuita y abierta de Landsat en 2008. El registro de datos a largo plazo de Landsat proporciona un recurso incomparable para observar la cobertura de la tierra y el cambio en su uso durante décadas, es por esto que son los datos usados para este análisis multitemporal del cambio en la cobertura del glaciar del nevado del Ruiz.

Para este trabajo se utilizaron 27 imágenes Landsat (tabla 2) de los satélites; Landsat 2-4 MSS, Landsat 4-5 TM, Landsat 7 ETM y Landsat 8 OLI, descargadas de U.S. Geological Survey's Earth Resources Observation and Science (EROS) o de NASA's Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). Las imágenes se seleccionaron con un criterio de baja cobertura de nubes en la zona del nevado del Ruiz, de esta forma se obtiene la mayor serie temporal posible de imágenes Landsat de esta área. Todas las imágenes

descargadas fueron procesadas por el USGS con un nivel 1, es decir que el pixel de cada imagen tiene asociado un nivel digital en función de la calidad radiométrica del sensor.

Fecha de adquisición	Satélite	Fecha de adquisición	Satélite	Fecha de adquisición	Satélite
1976/02/01	Landsat 2 MSS	1999/07/10	Landsat 5 TM	2014/12/26	Landsat 8
1984/01/30	Landsat 4 MSS	2004/02/06	Landsat 7	2015/01/03	Landsat 7
1986/09/08	Landsat 5 TM	2007/01/29	Landsat 7	2015/12/21	Landsat 7
1987/01/14	Landsat 5 TM	2009/05/26	Landsat 7	2015/12/29	Landsat 8
1987/12/24	Landsat 4 MSS	2010/01/05	Landsat 7	2016/01/14	Landsat 8
1988/10/23	Landsat 4 TM	2010/01/21	Landsat 7	2016/07/08	Landsat 8
1989/08/07	Landsat 4 TM	2011/09/05	Landsat 7	2017/12/18	Landsat 8
1990/07/25	Landsat 4 TM	2012/10/25	Landsat 7	2018/02/28	Landsat 7
1997/10/24	Landsat 5 TM	2013/07/24	Landsat 7	2018/12/29	Landsat 7

Tabla 2. Imágenes satelitales usadas en el proyecto

Fuente: elaboración propia a partir de datos de la USGS.

La figura 4 muestra la serie temporal de las imágenes (fechas de adquisición en la tabla 2) usadas en esta investigación.

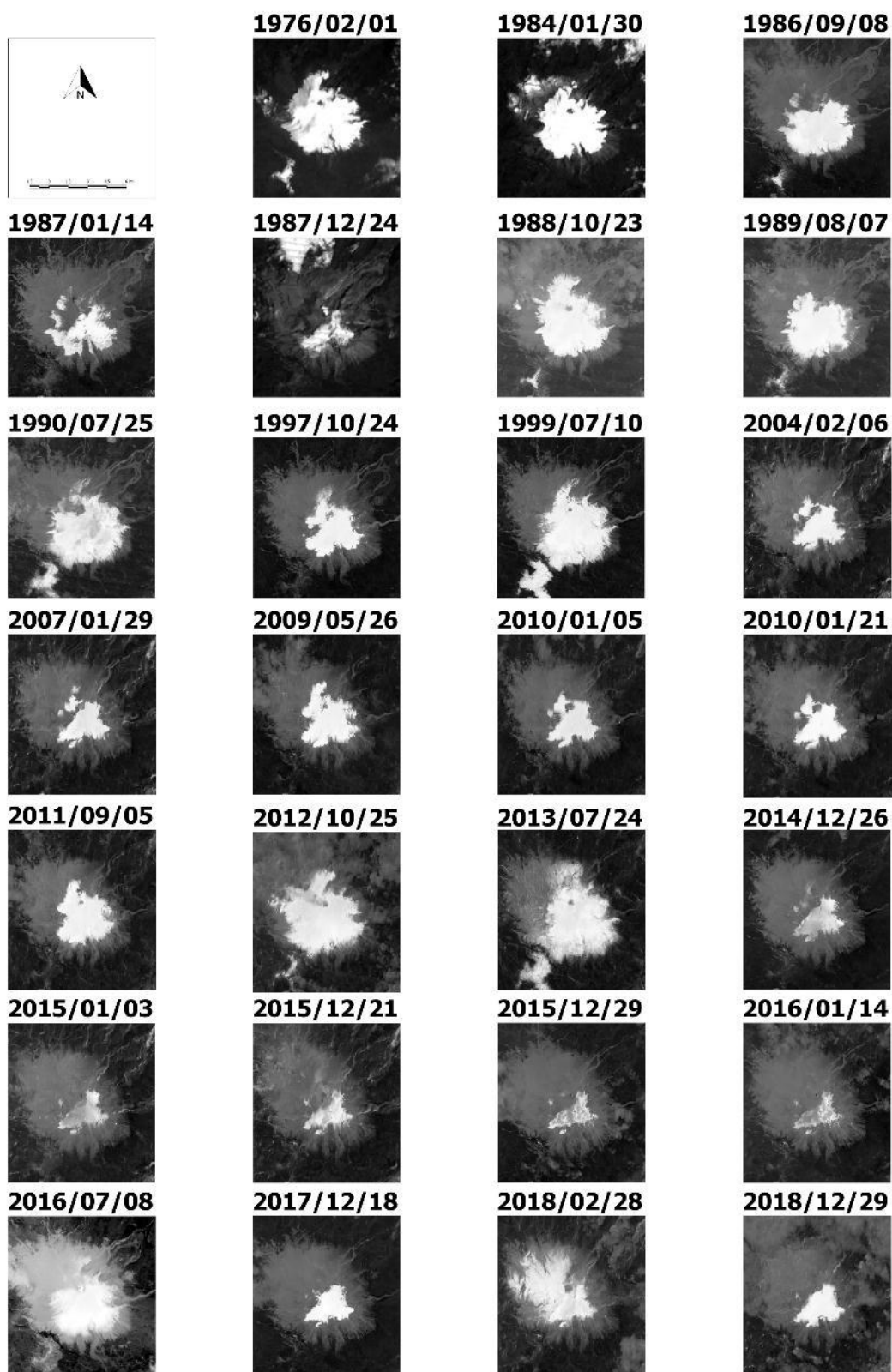


Figura 4. Serie temporal de área glaciár. Banda verde o infrarroja según sensor
Fuente: elaboración propia.

(T3) Métodos de teledetección

(T4) Corrección atmosférica - DOS

Como parte del procesamiento de las imágenes se debe realizar la corrección atmosférica, proceso que se aplica a las imágenes digitales, con el propósito de eliminar el efecto de los aerosoles y la radiancia intrínseca que se introduce en el sensor y se ve reflejado en la imagen, como producto de la interacción del sensor con la atmósfera. Para este proyecto, y dada la multitemporalidad de los datos, se utiliza el modelo de *dark-object subtraction* (DOS) propuesto por Chávez (1996), este método permite realizar una corrección sin haber medidos valores atmosféricos *in situ*.

(T4) Índice de nieves - NDSI

Desde la teledetección es posible discriminar la nieve, la cual tiene una alta reflectividad en la parte del espectro visible; sin embargo, las nubes también tienen alta reflectividad en esta parte del espectro, razón por la cual resulta indispensable usar el infrarrojo de onda corta (*short-wave infrared* - SWIR) debido a que en esta zona del espectro los cristales de las nubes son más pequeños que los granos de nieve (Chuvieco, 2016). Por esta razón el índice de nieves (*normalized difference snow index*, NDSI) resulta de gran utilidad para diferenciar las zonas de nieve.

$$NDSI = \frac{GREEN - SWIR1}{GREEN + SWIR1} \quad (1)$$

Donde, *GREEN* corresponde a la banda verde y *SWIR1*, a la banda de la región del infrarrojo cercano.

(T4) Clasificación no supervisada: *k-means*

La información de las imágenes multispectrales se condensa en la clasificación, con lo cual se obtiene la cartografía y el inventario las categorías objeto de estudio (Chuvieco, 1990); en este caso: el área glaciar. En la clasificación se distinguen tres etapas: i) definición de las categorías, ii) distribución de los píxeles de la imagen en cada categoría, iii) comprobación y verificación de los resultados (Chuvieco, 1990). Con lo anterior es posible categorizar las clasificaciones en supervisadas o no supervisadas, tomando como referencia la manera como se definen las categorías, con o sin intervención del operador, respectivamente. La distribución de los píxeles se hace a partir de esta simple suposición: los patrones se clasifican según la pertenencia a la clase del prototipo o centro de agrupación más cercano usando el concepto de *distancia*. Por ejemplo, el clasificador ISODATA utiliza la distancia euclidiana como métrica para calcular la distancia, mientras que el clasificador de máxima verosimilitud usa las distancias transformadas o ponderadas (Sohn y Rebello, 2002).

En este proyecto se utiliza el método *k-means* (MacQueen, 1967) que agrupa los n píxeles de la imagen en un conjunto de k grupos en el que cada observación pertenece al grupo cuyo valor medio es más cercano.

(T2) Metodología

El flujo metodológico utilizado en esta investigación para discriminar el área glaciaria, en lo que corresponde a la teledetección, se muestra en la figura 5.

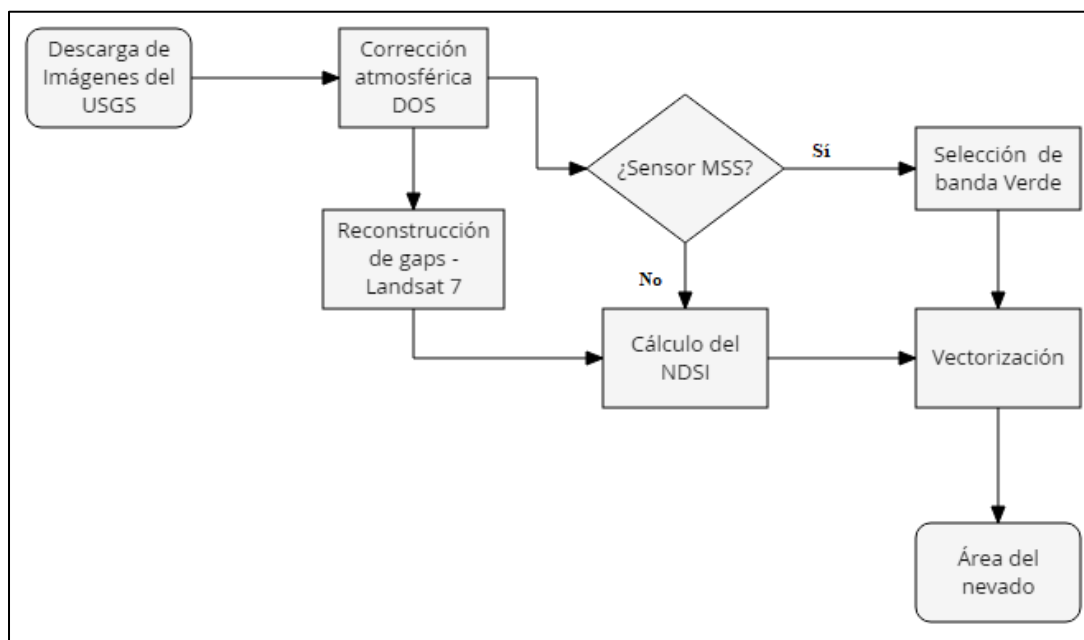


Figura 5. Flujo de procesamiento de información

Fuente: elaboración propia.

Como parte del preprocesamiento, a las imágenes adquiridas con el satélite Landsat 7 se les reconstruyeron los *gaps* para tener mayor precisión en la determinación del área glaciaria. En cuanto a las adquiridas con el sensor *multispectral scanner system* (MSS) que no tiene ninguna banda correspondiente a la región del infrarrojo cercano se utilizó la banda verde únicamente para la discriminación de la nieve. En lo que respecta a la vectorización, esta consiste en convertir de *raster* a vector la clase asociada al área glaciaria.

(T3) Monitoreo del ENSO

El *oceanic Niño index* (ONI) (Dahlman, 2009) es un indicador de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) dispuesto para monitorear El Niño (eventos cálidos) y La Niña (eventos fríos) en el océano Pacífico tropical. Se calcula como la media móvil de tres meses de las anomalías de la temperatura superficial del mar para la región. Para los valores del ONI iguales o mayores a 0,5 se considera la presencia de El Niño, mientras que los valores iguales o menores a -0,5 es presencia de La Niña. Para este proyecto se consultó⁵ el ONI para el trimestre en el que fue adquirida cada una de las imágenes usadas en el estudio.

(T3) Coeficientes de la serie de Fourier

⁵ https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php

Si se tiene un conjunto de datos; $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ para un par de variables x y y , asumiendo que estos datos son descritos por una función $F(x)$ la variable de estudio se puede describir como; $y_i = F(x_i) + \epsilon_i$; donde ϵ_i son los errores del modelo. En este sentido, definiendo un intervalo dado por los datos que se quieren ajustar (en este caso el área del glaciar), se puede ajustar el conjunto de datos a una serie de Fourier (ecuación (2)) (Chapra y Canale, 2010).

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(w_n t) + b_n \sin(w_n t)] \quad (2)$$

Donde, W_n es la posición angular, y a_n y b_n , los coeficientes de Fourier

$$w_n = n \frac{2\pi}{T}$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_2} f(t) \cos(w_n t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_2} f(t) \sin(w_n t) dt$$

En este estudio se usa una serie de Fourier para tratar de describir el comportamiento oscilatorio que puede tener el área glaciar por influencia de las fases del ENSO.

(T3) Asociación de la variación de área glaciar con las oscilaciones del ENSO

Se obtuvieron los valores de ONI para el periodo de cada imagen de la serie temporal. Con el objetivo de modelar la relación área glaciar – ONI (ecuación (3)), se ajustaron los datos a una función descrita por una serie de Fourier de tres coeficientes;

$$\begin{aligned} \text{Área}(\text{ONI}) = & a_0 + a_1 \cos(\text{ONI} \cdot w) + b_1 \sin(\text{ONI} \cdot w) + a_2 \cos(2(\text{ONI}) \cdot w) + \\ & b_2 \sin(2(\text{ONI}) \cdot w) + a_3 \cos(3(\text{ONI}) \cdot w) + b_3 \sin(3(\text{ONI}) \cdot w) \end{aligned} \quad (3)$$

Donde, el *Área* está en función del *ONI* estos datos fueron tomados de la tabla 3. Los coeficientes a y b son los de Fourier, y w es el parámetro asociado al periodo.

(T2) Resultados y análisis de resultados

Los resultados se presentan de acuerdo con cada temática planteada en la metodología, a saber: teledetección, ONI, y relación de ONI/imágenes.

(T3) Teledetección

A cada una de las 27 imágenes utilizadas en el proyecto (tabla 2) se le calculó el NDSI y posteriormente se clasificó a través del método *k-means* en el *software SAGA GIS*, usando

como parámetro cinco clases (figura 6), dejando como clase de “nieve” a la que se localiza en el pico del glaciar. Esta es usada para calcular el área del glaciar (tabla 3), la cual en promedio es de 1270 ha. Cada área es convertida a formato vectorial para el resto del análisis.

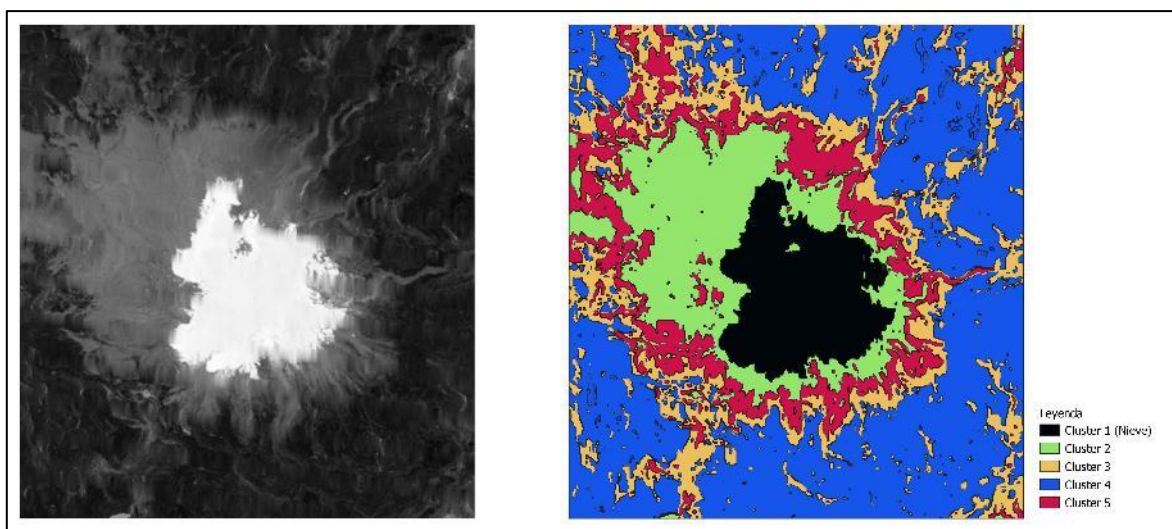


Figura 6. Izq.: NDSI imagen adquirida en 2011/09/05; der.: clasificación no supervisada del NDSI.

Fuente: elaboración propia.

Las áreas calculadas en este proyecto (tabla 4) se trataron de comparar con las áreas reportadas por el Ideam (tabla 1), sin embargo, se encontró que los años de análisis en común solo son cinco y que se desconoce el periodo en el que fue realizado el cálculo del Ideam (2018). A partir de lo anterior, en la tabla 3 se presentan las áreas del glaciar (tanto por el Ideam como la hallada en este trabajo); adicionalmente se detalla el trimestre de precipitación en el que el área de este proyecto fue calculada, y finalmente, se muestra la discrepancia en las áreas tomando el área del Ideam como referencia.

Tabla 3. Diferencia entre las áreas calculadas por el Ideam (2018) y las áreas calculadas en este trabajo

Año	Área glaciar (km ²) - Ideam	Área glaciar (km ²) este proyecto	Trimestre precipitación	Discrepancia entre áreas
1986	17	16,77	SON	1,35%
1997	11,76	12,38	SON	-5,27%
2010	10,3	8,93	DEF	13,30%
		8,51	DEF	17,38%
2016	9,2	4,27	DEF	53,59%
		17,06	JJA	-85,43%
2017	8,7	6,35	DEF	27,01%

Fuente: elaboración propia.

Al analizar la tabla 4, se evidencia que existen discrepancias con las áreas calculadas en el trimestre SON (temporada de lluvias). En el caso de 1986 y 1997, los valores son menores

del 5 %, lo que muestra una alta similitud en las áreas. En los años 2010 y 2016, este estudio tiene dos imágenes para el mismo año, sin embargo, los trimestres de estudio corresponden a la temporada seca. Para 2010, las dos fechas son del trimestre DEF y las diferencias oscilan entre aproximadamente el 13 % y el 17 %, siendo inferiores las áreas halladas en este proyecto. En el año 2016, los trimestres de análisis correspondieron a periodo seco, pero la primera fecha es del primer semestre y la segunda fecha al segundo semestre, en este caso las discrepancias muestran valores muy altos (53 % y -85 %, respectivamente). Sin embargo, si se toma el área como un valor promedio de ambas fechas, el área del glaciar sería de 10,66 km², lo que obedecería a una discrepancia de -15,92 %. Finalmente, en 2017, la fecha de análisis en este estudio corresponde al trimestre DEF y la discrepancia es de casi el 27%, siendo la mayor discrepancia para el periodo seco.

De lo anterior se puede concluir que los valores obtenidos en este trabajo pueden ser comparables bajo algunas condiciones, como estar en el periodo SON, mientras que los cálculos del área que se realizan en el periodo JJA son completamente diferentes. Por lo que sería importante conocer más que el año de análisis, y tener en cuenta el contexto del ENSO para una correcta comparación, como es la hipótesis de este trabajo.

(T3) Monitoreo del ENSO

Se obtuvieron los valores de ONI para el periodo de cada una de las imágenes de la serie temporal (tabla 3).

Tabla 4. Datos de área glaciar calculada e índice ONI para cada fecha de análisis

Fecha	Área glaciar (ha)	ONI	Fecha	Área glaciar (ha)	ONI	Fecha	Área glaciar (ha)	ONI
1976/02/01	1847.56	-1.6	1999/07/10	2467.48	-1	2014/12/26	698.943	0.6
1984/01/30	1762.75	-0.4	2004/02/06	898.732	0.4	2015/01/03	573.356	0.7
1986/09/08	1677.36	0.4	2007/01/29	809.47	0.3	2015/12/21	505.543	2.5
1987/01/14	1114.59	1.2	2009/05/26	1285.81	0.4	2015/12/29	472.959	2.5
1987/12/24	392.01	0.8	2010/01/05	893.256	1.6	2016/01/14	427.507	2.5
1988/10/23	2133.88	-1.8	2010/01/21	851.363	1.3	2016/07/08	1706.38	0
1989/08/07	1650.16	-0.4	2011/09/05	1368.50	-0.7	2017/12/18	635.42	-1
1990/07/25	2151.59	0.3	2012/10/25	2191.66	0	2018/02/28	1647.05	-0.6
1997/10/24	1238.51	2.4	2013/07/24	2214.66	-0.4	2018/12/29	679.32	0.8

Fuente: elaboración propia.

La figura 7 muestra el área del glaciar en cada una de las 27 fechas del análisis (polígono azul), relacionada con el ONI (línea naranja), en color rojo se representan los valores normales del ONI (-0,5 a 0,5). En el análisis de la gráfica se evidencia cómo el área del glaciar retrocede ostensiblemente en épocas del fenómeno de El Niño, como en los picos de la gráfica que corresponden a 1987, 1997, 2010 y 2016; mientras que en periodos de La Niña recupera área glaciar: 1988, 1998, 2012 y 2017. Estos datos indican correspondencia con lo presentando por Kaser (1999), quien manifiesta que los glaciares pueden recuperar el área perdida, en este caso este proceso se da en las fases de La Niña. Adicionalmente, los

resultados son congruentes con el trabajo de Pérez y Gómez (2018) que identifican que el retroceso no es constante ya que el área glaciaria experimenta algunas fluctuaciones dentro de las fases climáticas. Igualmente, se evidencia una gran pérdida del área glaciaria correspondiente con el fenómeno de El Niño del año 2016, el cual la FAO (2016) reportó como uno de los más fuertes en la historia.

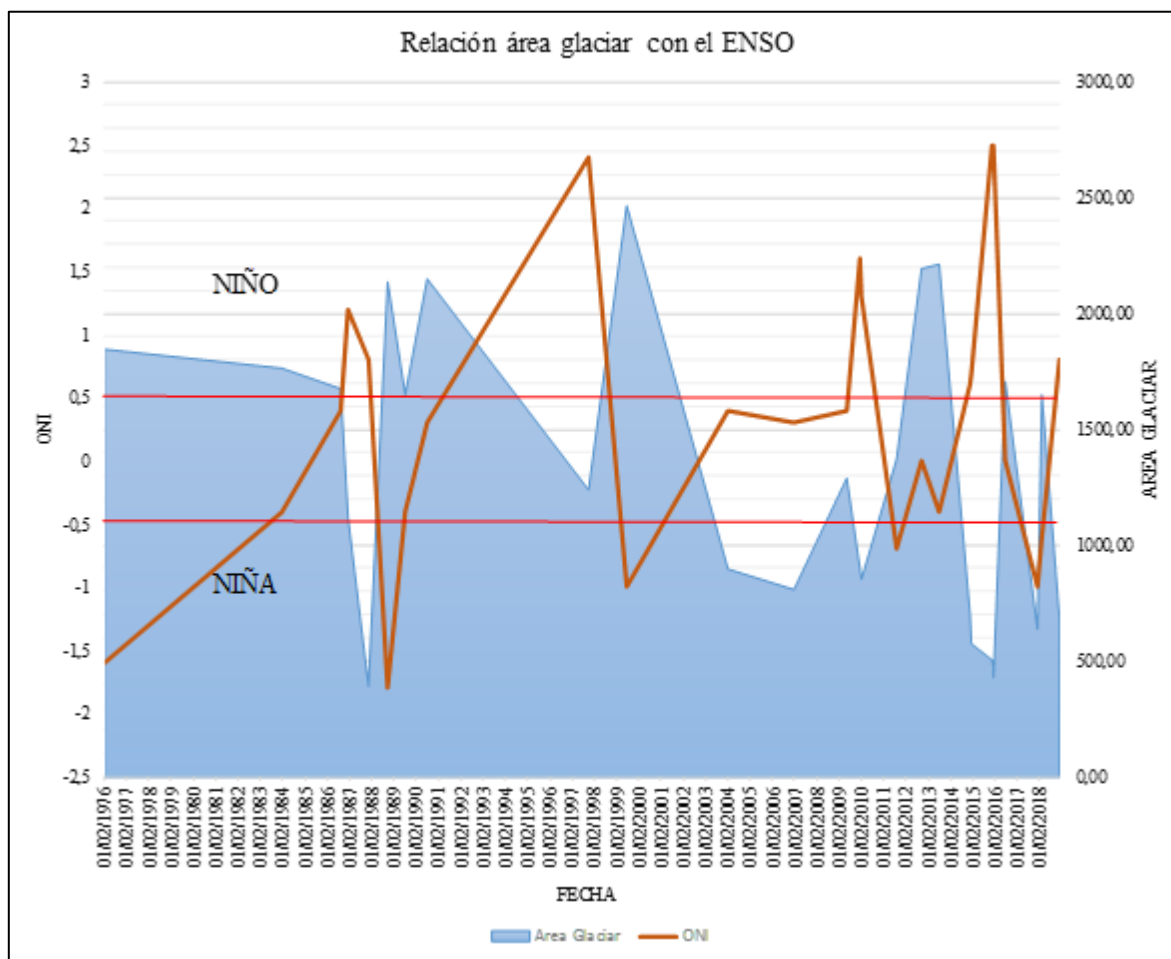


Figura 7. Área glaciaria del nevado del Ruiz 1976-2018

Fuente: elaboración propia.

De otra parte, lo que es preocupante del análisis de la figura 7 es que la recuperación del área después de la fase cálida de El Niño de 2016 no fue tan importante como en ciclos anteriores, por lo que es posible que otros factores hayan afectado la recuperación del área. Además, se debe hacer seguimiento para evidenciar el comportamiento futuro.

(T3) Asociación de la variación de área glaciaria con las oscilaciones del ENSO

A partir de los datos del área y el ONI se determina una función de ajuste descrita por una serie de Fourier (ecuación (4)), dicha función fue obtenida usando *Matlab*; los coeficientes se muestran en la tabla 5, la calidad de ajuste de esta función está definida por un R^2 de 0,7604. Esto muestra que es posible modelar el área glaciaria en función de los valores del ENSO en sus diferentes fases representado en los valores del ONI. El mejor ajuste se logró

al usar tres coeficientes; si se tuvieran mayor número de datos sería posible aumentar el número de coeficientes y así mismo lograr un mejor ajuste.

$$\text{Área}(\text{ONI}) = a_0 + a_1 \cos(\text{ONI} \cdot w) + b_1 \sin(\text{ONI} \cdot w) + a_2 \cos(2(\text{ONI}) \cdot w) + b_2 \sin(2(\text{ONI}) \cdot w) + a_3 \cos(3(\text{ONI}) \cdot w) + b_3 \sin(3(\text{ONI}) \cdot w) \quad (4)$$

Coefficiente	Valor
a_0	784.2
a_1	1177
b_1	-600.9
a_2	-1080
b_2	269.3
a_3	1010
b_3	-306
w	0.88

Tabla 5. Coeficientes de serie de Fourier

Fuente: elaboración propia.

La función descrita por Fourier (ecuación (4), línea azul en la figura 8) permite modelar la relación área glaciar-ONI como se muestra en la figura 8, donde la relación del área del glaciar (como variable dependiente) y el ONI (como variable independiente) permiten ver que existe relación de valores altos de ONI con bajas áreas glaciares y recuperación de áreas relacionadas con bajos valores de ONI, congruente con lo evidenciado en la figura 7. Esto permite entender que el nevado puede perder gran parte de su área glaciar en fases del fenómeno de El Niño y posiblemente recuperar área en una fase del fenómeno de La Niña.

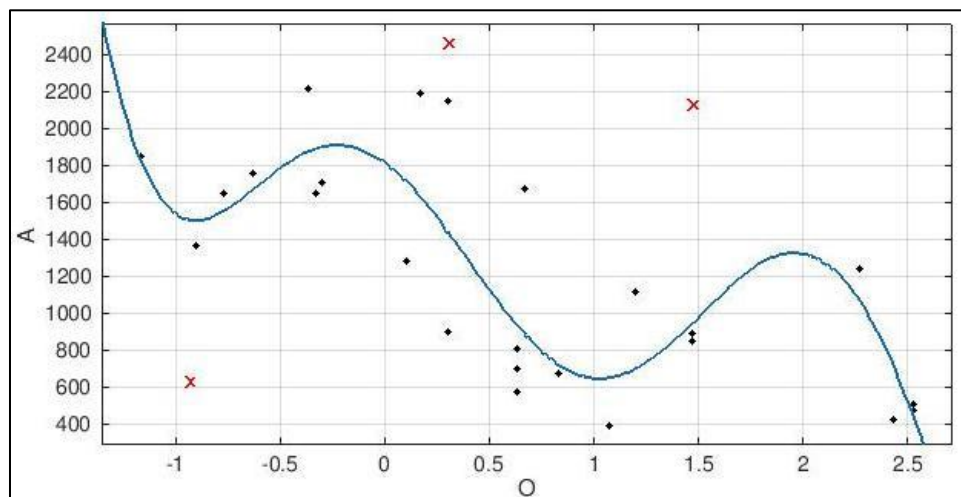


Figura 8. Comportamiento del área glaciar y el ONI

Fuente: elaboración propia.

Buscando claridad en la relación del ONI con los datos obtenidos en el análisis temporal, una segunda función fue modelada (con la misma metodología) esta vez con los datos del área del glaciar, en función del tiempo o los años de la serie temporal de las imágenes. Esta

función no se ajustó a una serie de Fourier, por lo cual fue necesario recurrir a una suma de senos con cuatro coeficientes (ecuación (5)).

$$\begin{aligned} \text{Área}(t) = & a_1 \sin(b_1 t + c_1) + a_2 \sin(b_2 t + c_2) + a_3 \sin(b_3 t + c_3) \\ & + a_4 \sin(b_4 t + c_4) \end{aligned} \quad (5)$$

Donde $\text{Área}(t)$ es el área del glaciar en función del tiempo. Los coeficientes a , b y c describen la amplitud, periodo y desfase de la función, los valores calculados se muestran en la tabla 6. Con esta función se obtiene un R de 0,7183.

Tabla 6. Coeficientes de la función de suma de senos

Coeficiente	Valor	Coeficiente	Valor
a_1	15770	a_3	486.9
b_1	0.05708	b_3	0.5109
c_1	32.56	c_3	-140.8
a_2	14290	a_4	430.5
b_2	0.0598	b_4	1087
c_2	174.8	c_4	-125.8

Fuente: elaboración propia.

La función de la suma de senos (ecuación (5), línea azul en la figura 9), se grafica en la figura 9, en la que se mantiene el área como variable dependiente y el tiempo como independiente. Esta función (ecuación (5)) resulta más difícil de modelar y, a diferencia de la relación área-ONI (ecuación (4) figura 8), la función área-tiempo no muestra un patrón tan claro; se ven oscilaciones de valores a lo largo del periodo de estudio, que podrían considerarse periodos de pérdida y recuperación del área glaciar asociado con el ciclo del ENSO. Sin embargo, hay que resaltar la tendencia de decaimiento del área para los últimos años, como se evidenció en la figura 7.

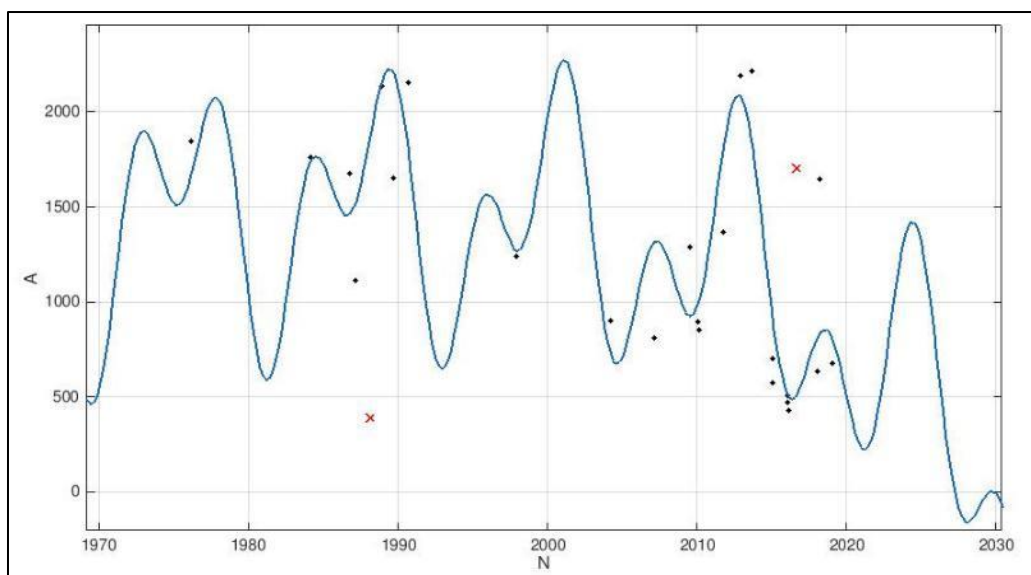


Figura 9. Comportamiento del área glaciar entre los periodos 1976-2018

Fuente: elaboración propia.

El modelar una función que describa el retroceso glaciar en función del tiempo no parece ser suficiente para estudiar un nevado; en ese sentido, dar una fecha de pérdida total de área glaciar no es viable tan solo modelando área versus tiempo. En este trabajo se muestra que una de las variables más importantes a considerar es el ENSO, el cual tiene un comportamiento muy particular en el tiempo que hasta la fecha no es posible predecir con alta precisión (Pérez y Gómez, 2018; Vélez, Díaz, Rodríguez y Morales, 2018; Salamanca y Ruíz, 2008). Para predecir un retroceso de área glaciar en un nevado intertropical es necesario ajustar un modelo de numerosas variables, y estudiar el cambio climático a escala global, y como se muestra en esta investigación el ENSO puede ser una primera aproximación para el monitoreo de un nevado tropical

El análisis del nevado del Ruiz y demás glaciares intertropicales, actualmente, es de gran importancia en un contexto de planeación ante el cambio climático. Los resultados de este trabajo muestran la importancia de monitorear el ENSO en función de dicho retroceso. La serie temporal de 27 imágenes Landsat permitió establecer un análisis más amplio que el propuesto en otros trabajos (Ideam, 2018), donde consideran un comportamiento de decaimiento continuo del área de un glaciar a lo largo del tiempo, mientras que los resultados aquí indican ciclos de ganancia y pérdida del área glaciar, que pueden explicarse con el ENSO. Lo anterior explica la contradicción de las predicciones de retroceso glaciar presentadas en Rabatel *et al.* (2012) y mejorar los resultados del Ideam (2018).

(T2) Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se presentó una metodología para calcular el área del glaciar nevado del Ruiz a partir de imágenes del satélite Landsat. Estas áreas fueron cruzadas con los datos del ONI para posteriormente establecer funciones (con un ajuste de R^2 superior a 0,7) que permitan establecer una relación del retroceso glaciar con el fenómeno del ENSO.

Los resultados entregan una aproximación modelando el área versus el ENSO, la aplicación de esto puede permitir el diseño de mejores políticas sociales y ambientales que mitiguen los efectos de un ciclo de altas temperaturas que haga perder área del nevado afectando así el abastecimiento del agua, como lo expresa la FAO (2016).

La mayor limitante de usar imágenes de un sensor pasivo es que la influencia de nubes no permite realizar un análisis constante en el glaciar a lo largo del tiempo. Los sensores de radar permiten monitorear un área glaciar de manera constante, ya que no presenta los mismos problemas con la nubosidad como los pasivos. Entonces, si se combina la información aquí obtenida con un análisis posterior con sensores de radar sería posible mejorar el modelo que describa el comportamiento del área glaciar en función de los ciclos ENSO. Para realizar un modelo más robusto se debe considerar un mayor número de variables; para una mayor calidad, estas deberían ser tomadas en campo de manera periódica.

(T2) Referencias bibliográficas

- Butcher, G., Barnes, C. y Owen, L. (2019). Landsat: The cornerstone of global land imaging. *GIM International*, pp.31-35.
- Ceballos, J.L., Euscátegui, C., Ramírez, J., Cañón, M., Huggel, C., Haeberli, W. y Machguth, H. (2006). Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia. *Annals of Glaciology*, 43, 194-201.
- Chapra, S.C. y Canale, R.P. (2010). *Numerical methods for engineers*. Boston: McGraw-Hill Higher Education.
- Chávez, P.S. (1996). Image-based atmospheric corrections-revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9), 1025-1035.
- Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid: Ediciones Rialp.
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of satellite remote sensing: An environmental approach*. Reino Unido: CRC Press.
- Dahlman, L. (2009). Climate Variability: Oceanic Niño Index. *NOAA Climate.gov*. Recuperado de <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-oceanic-ni%C3%B1o-index>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2016). *2015–2016 El Niño Early action and response for agriculture, food security and nutrition*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i6049e.pdf>
- Huggel, C., Ceballos, J.L., Pulgarín, B., Ramírez, J. y Thouret, J.C. (2007). Review and reassessment of hazards owing to volcano–glacier interactions in Colombia. *Annals of Glaciology*, 45, 128-136.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) (2012). *Glaciares de Colombia: más que montaña con hielo*. Bogotá.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) (2018). *Glaciares en Colombia*. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/glaciares-colombia>
- Kaser, G. (1999). A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. *Global and Planetary Change*, 22(1-4), 93-103.
- Knight, P.G. (1999). *Glaciers*. Reino Unido: Stanley Thornes Ltd. Introducción.
- Kovats, R.S. (2000). El Niño and human health. *Bulletin of the World Health Organization*, 78(9), 1127–1135.
- MacQueen, J.B. (1967). Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations. En *Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability I* (pp. 281–297). EE. UU.: University of California Press.
- Pandey, A., Sarkar, M.S., Kumar, M., Singh, G., Lingwal, S. y Rawat, J.S. (2018). Retreat of Pindari glacier and detection of snout position using remote sensing technology. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 11, 64-69.
- Pérez, C.S. y Gómez, K.D.D. (2018). Análisis del retroceso glaciar del volcán nevado del Ruiz, mediante un estudio multitemporal de imágenes satelitales del periodo 1999-2016. *Revista de Topografía Azimut*, 1(9), 9-16.
- Puertas Orozco, O. y Carvajal Escobar, Y. (2008). Incidencia de El Niño-Oscilación del Sur en la precipitación y la temperatura del aire en Colombia, utilizando el Climate Explorer. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, 23, 104-118.
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gómez, J., Cáceres, B., Ceballos, J.L. y Scheel, M. (2012). Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7(1), 81-102.

- Salamanca, G.H. y Ruiz, J. (2008). Retroceso glaciar en la Sierra Nevada del Cocuy, Boyacá-Colombia, 1986-2007. *Perspectiva Geográfica: Revista del Programa de Estudios de Posgrado en Geografía*, 13, 27-36.
- Sohn, Y. y Rebello, S. (2002). Supervised and unsupervised spectral angle classifiers. *PE&RS*, 68(12), 1271-1280.
- Thompson, L.G., Mosley-Thompson, E., Davis, M.E. y Brecher, H.H. (2011). Tropical glaciers, recorders and indicators of climate change, are disappearing globally. *Annals of Glaciology*, 52(59), 23-34.
- Vélez, E.F.Á., Díaz, H.C., Rodríguez, J.O.G. y Morales, J.A.O. (2018). Cuantificación del retroceso glaciar del nevado del Tolima, aplicando técnicas de teledetección. *Revista de Topografía AZIMUT*, 9(1), 37-45.
- Yue, L., Shen, H., Yu, W. y Zhang, L. (2018). Monitoring of historical glacier recession in yulong mountain by the integration of multisource remote sensing data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(2), 388-400.